

der Eigenschaften der Atmosphäre (wichtig ist dabei der momentane Feuchtigkeitsgehalt) erreicht. Auch die Restbeschleunigung des Satelliten hatte man sehr gut unter Kontrolle, da einerseits das Gewicht von Cassini sehr groß ist und andererseits während der Messung alle anderen Subsysteme des Satelliten ausgeschaltet waren (nur Positions- und Lageregelung waren aktiv). Nur der Druck des Sonnenwindes und die thermische Abstrahlung trugen zu einer Beschleunigung bei, wobei zeitliche Änderungen der thermischen Eigenschaften und der Abstrahlung des Satellitenmaterials sowie der Sonnenaktivität vernachlässigt werden konnten. Ansonsten wurden diese Modelle und Daten mit den aus dem genauen Doppler-Tracking gewonnenen Daten abgeglichen.

Die aus der Datenanalyse gewonnene Abschätzung $|\gamma - 1| \leq (2,1 \pm 2,3) \cdot 10^{-5}$ verbessert die Bestätigung der ART um mehr als eine Größenordnung. Damit ist diese Messung schon sehr nahe an dem Bereich, in dem gewisse eingangs erwähnte und durch die Quantengravitation motivierte Szenarien Abweichungen von der ART von bis zu $|\gamma - 1| \approx 2 \cdot 10^{-5}$ für möglich halten [4]. Allerdings müssen wir noch eine Weile Geduld haben, bis dieser Bereich wirklich experimentell zugänglich ist: Erst mit der Mission GAIA (geplanter Start 2010) kann über die hochpräzise Beobachtung der Lichtablenkung, deren bester Wert heutzutage mittels interkontinentaler VLBI (Very Long Baseline Interferometry) bei $|\gamma - 1| \leq 3 \cdot 10^{-4}$

liegt, eine Abschätzung mit einer Genauigkeit von bis zu $5 \cdot 10^{-7}$ erreicht werden.

CLAUS LÄMMERZAHL

- [1] I.I. Shapiro et al., Phys. Rev. Lett. **20**, 1265 (1968)
- [2] R.D. Reasenber et al., Astrophys. J. Lett. **234**, L219 (1979)
- [3] B. Bertotti, L. Iess und P. Tortora, Nature **425**, 374 (2003)
- [4] T. Damour et al., Phys. Rev. D **66**, 046007 (2002)

Ausdehnung ausgeschlossen

Die intermetallische Verbindung YbGaGe dehnt sich bei Erwärmung praktisch nicht aus

Die meisten Festkörper dehnen sich aus, wenn sie erwärmt werden, da die Schwingungen der Atome im anharmonischen Gitterpotential zu einem Anwachsen des Atom-Atom-Abstands führen. Seit etwas über 100 Jahren sind aber auch Verbindungen bekannt, die in einem bestimmten Temperaturintervall eine sehr niedrige – fast verschwindende – thermische Ausdehnung aufweisen. Diese Verbindungen, deren erste die 1896 entdeckte Invar-Legierung $\text{Fe}_{0,65}\text{Ni}_{0,35}$ war, sind technisch von großer Bedeutung, insbesondere wenn die Ausdehnung über große Temperaturintervalle verschwindet. Kürzlich haben amerikanische Wissenschaftler an der Michigan State University gezeigt, dass sich die intermetallische Verbindung YbGa-

Ge für Temperaturen zwischen 100 und 400 K praktisch nicht ausdehnt [1]. Die Ursache dafür ist in den elektronischen Eigenschaften der Verbindung zu suchen.

Die Suche nach Materialien mit verschwindender thermischer Ausdehnung reicht bis in die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts nach

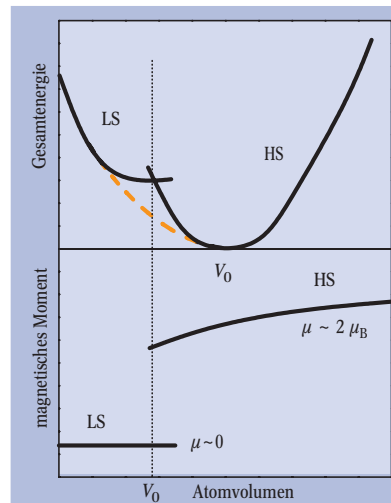


Abb. 1: Gesamtenergie und magnetisches Moment in Abhängigkeit vom Atomvolumen (schematisch). Die gestrichelte orange Kurve stellt die zusätzliche Anharmonizität dar, die sich aus der Existenz des LS-Zustandes ergibt (s. Text)

Frankreich zurück und war militärisch motiviert: Bei der Artillerie führte das kontinuierliche Abfeuern von Geschützen regelmäßig zu deren Ausfall, da sich die Kanonen bereits nach wenigen Abschüssen ausdehnten. Um dies zu verhindern, suchten daher die Metallurgen mit großem Aufwand nach neuen Verbindungen. Darüber hinaus tauchte Ende des 19. Jahrhunderts auch das Problem auf, einen Ersatz für den teuren Urmeter aus Platin und Iridium zu finden, der bis dahin aufgrund seiner niedrigen

thermischen Ausdehnung als internationaler Längenstandard diente. Der Durchbruch gelang Charles-Edouard Guillaume 1896 mit der Invar-Legierung $\text{Fe}_{0,65}\text{Ni}_{0,35}$ – dem ersten Material mit verschwindender thermischer Ausdehnung bei

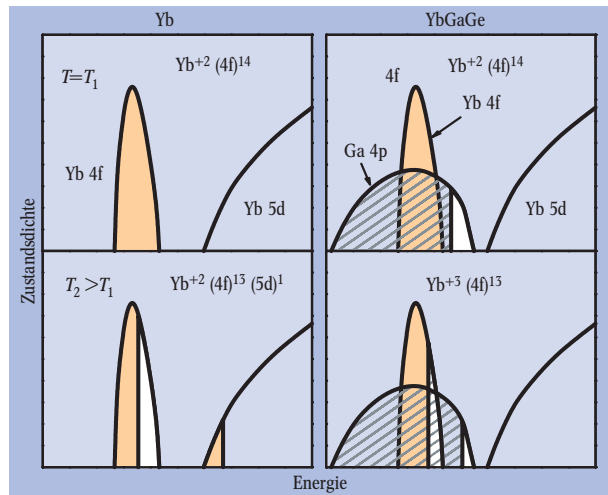


Abb. 2: Änderung der elektronischen Konfiguration des Yb^{2+} -Ions mit der Temperatur für Yb und YbGaGe. oben: Tieftemperaturzustand. unten: Hochtemperaturzustand.

Zimmertemperatur. Das Problem des Urmetermaterials war damit gelöst. Diese Entdeckung hatte große Auswirkungen auf die Metrologie und führte zur Entwicklung weiterer, verwandter Materialien, u. a. Elinvar, Superinvar, usw. [2]. Für seine Forschung auf dem Gebiet des Invar erhielt Guillaume 1920 den Nobelpreis.

Die Ursache des Invar-Effekts blieb lange im Dunkeln. Im Jahr 1926 vermutete der japanische Physiker H. Masumoto als Erster, dass der Effekt auf die magnetischen und elektronischen Eigenschaften zurückzuführen ist [3]. Heute weiß man aus ab-initio-Bandstrukturrechnungen bei $T = 0$, dass der Grundzustand beim Atomvolumen V_0 ein großes magnetisches Moment μ von ca. $2 \mu_B$ aufweist und daher High-Spin-Zustand (HS) genannt wird (Abb. 1). Verkleinert man das Volumen, so ändert sich bei einem kritischen Wert $V < V_c$ das Moment sprunghaft und das Invar-System geht in den angeregten LS-Zustand (Low Spin) mit $\mu \sim 0$ über. Aufgrund des LS-Zustandes entsteht in der Potentialkurve $E(V)$ eine zusätzliche Anharmonizität für $V < V_0$ (orange gestrichelt), sodass sich die Atome im Vergleich zu einem „normalen“ Metall weiter annähern können. Mit steigender Temperatur wird der LS-Zustand mit kleinem Volumen zunehmend besetzt und dadurch die „normale“ thermische Ausdehnung kompensiert. Mikroskopisch lässt sich

dieses Verhalten aus der Besetzung der 3d-Atomorbitale an der Fermi-Energie verstehen: Während im HS-Zustand stark abstoßende anti-bindende Zustände (mit t_{2g} -Symmetrie) besetzt sind (großer Atomabstand), befinden sich diese Zustände beim LS-Zustand oberhalb der Fermi-Energie und weniger abstoßende, nicht-bindende Zustände (e_{2g}) sind besetzt (geringerer Atomabstand).

Die Ursache der verschwindenden Ausdehnung in der neuen Verbindung YbGaGe ist, wie in Invar, ebenfalls auf elektronische Eigenschaften zurückzuführen. Jedoch unterscheidet sich die Natur der elektronischen Übergänge. Für eine Erklärung sind die Eigenschaften des Yb^{2+} -Ions essenziell. Yb^{2+} existiert in zwei unterschiedlichen elektronischen Konfigurationen: $(4f)^{14}$ sowie $(4f)^{13}(5d)^1$, wobei das Ion mit dem d-Elektron ein deutlich kleineres Volumen hat. Die relative Besetzung der Zustände hängt von der Temperatur ab, und mit zunehmender Temperatur nimmt die Population des Zustandes mit kleinem Volumen – wie bei Invar – zu, sodass die „normale“ Ausdehnung kompensiert wird. Beispiele für diesen Effekt sind in den Verbindungen YbCuAl und $\text{Sm}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{S}$ zu finden, in denen die thermischen Ausdehnungskoeffizienten bei Temperaturen zwischen 4,2 K und 300 K sogar negativ sind, d. h. der Effekt ist so stark, dass die „normale“ Gitterausdehnung überkompensiert wird.

Einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten, der in einem großen Temperaturintervall gleich null ist, findet man in der Verbindung YbGaGe. Hier überlappen die 4p-Bänder von Ga und die schmalen 4f-Bänder von Yb (Abb. 2). Bei tiefen Temperaturen (T_1) ist das Yb^{2+} -Ion in einer $(4f)^{14}$ Konfiguration. Mit zunehmender Temperatur (T_2) verlagert sich die Elektronendichte vom 4f-Band auf das Ga-4p-Band und die Konfiguration geht in $\text{Yb}^{3+}(4f)^{13}$ über. Zwar schrumpft das Yb-Ion, aber die Größe des Ga-Ions bleibt fast erhalten. Deswegen wird die Ausdehnung nicht so stark wie in YbCuAl und $\text{Sm}_{0,75}\text{Y}_{0,25}\text{S}$ kompensiert, sodass sie gerade im Temperaturintervall 100–400 K verschwindet.

Die Anwendungen von Materialien mit verschwindender Ausdehnung sind sehr vielfältig. Einige Beispiele sind: Schattenmasken für Fernschröhren, Glas-Metall-

Einschmelzungen, Chip-Carrier, Wellenleiter, Teleskopteile, Bimetalle, usw.. Jede Anwendung hat ihre eigene Spezifikation (Dimension, Temperaturbereich der Anwendung, chemische Umgebung, usw.), sodass neue Materialien immer willkommen sind. Außer dem Interesse an konkreten Anwendungen bietet die verschwindende thermische Ausdehnung jedoch auch immer noch grundlegende physikalische Herausforderungen. Die bisherigen Erklärungen beruhen auf Bandstrukturrechnungen, die nur für $T = 0$ K gültig sind. Auch über 100 Jahre nach der Entdeckung des Invar-Effekts ist es aus *ab initio*-Rechnungen noch immer nicht klar, wie der Prozess bei endlichen Temperaturen genau beschrieben werden kann.

MEHMET ACET

- [1] J. R. Salvador, F. Guo, T. Hogan und M. G. Kanatzidis, *Nature* **425**, 702 (2003)
- [2] E. F. Wassermann, in *Ferromagnetic Materials Vol. 5*, K. H. J. Buschow, E. P. Wohlfahrt (Hrsg.), North-Holland, Amsterdam (1990); vgl. *Phys. Blätter*, Mai 2000, S. 27
- [3] Honda Memorial Series on Material Science No. 3, *Physics and applications of Invar Alloys*, H. Saito (Hrsg.), Maruzen Company, Tokyo (1978)

■ Heizung der Sonnenkorona verstanden?

Die physikalische Natur der Korona, jenes herrlichen, bei totalen Sonnenfinsternissen in mannigfaltigen Formen sichtbaren Strahlenkranzes, blieb bis in die 30er-Jahre im Dunkeln. Ihre Entschlüsselung begann im Potsdamer Sonnenobservatorium Einsteinturm: Der als Spektroskopiker bekannte Walter Grotrian (Termschemata – „Grotrian-Diagramme“) hatte 1929 während einer Sonnenfinsternis-Expedition auf Sumatra Spektren der Koronastrahlung aufgenommen. Analysen dieser und ergänzender Daten führten Grotrian in den Folgejahren zu einer Reihe unerwarteter Ergebnisse: Es gelang ihm, mehrere Komponenten im Koronaspektrum zu identifizieren, und alle Interpretationen führten zum gleichen Ergebnis: Die Korona musste nicht nur eine sehr geringe Dichte aufweisen, sondern auch eine 200-fach höhere Temperatur als die Sonnenoberfläche in der Photosphäre. Aus dieser nur wenige hundert

Prof. Dr. Mehmet Acet, Institut für Physik, Universität Duisburg-Essen, 47048 Duisburg